



(19) BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

(12) Übersetzung der
europäischen Patentschrift
(97) EP 0693 176 B 1
(10) DE 694 21 393 T 2

(51) Int. Cl. 7:
G 01 M 13/00
G 01 M 13/04
G 01 H 1/00

DE 694 21 393 T 2

(21) Deutsches Aktenzeichen: 694 21 393.4
 (86) PCT-Aktenzeichen: PCT/US94/03808
 (96) Europäisches Aktenzeichen: 94 914 066.9
 (87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 94/24537
 (86) PCT-Anmeldetag: 7. 4. 1994
 (87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: 27. 10. 1994
 (97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 24. 1. 1996
 (97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: 27. 10. 1999
 (47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 31. 8. 2000

(30) Unionspriorität:
45604 09. 04. 1993 US

(71) Erfinder:
HERNANDEZ, Walter, C., Fairfax, VA 22031, US

(73) Patentinhaber:
Monitoring Technology Corp., Fairfax, Va., US

(74) Vertreter:
LENZING GERBER Patentanwälte, 40470
Düsseldorf

(84) Benannte Vertragstaaten:
DE, FR, GB, IT, SE

(54) VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERFASSUNG UND ANALYSE VON FEHLERN AN LAGERN UND
ANDEREN GLEITEND ROTIERENDEN KOMPONENTEN

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 694 21 393 T 2

0693 176

27.01.00

BESCHREIBUNG

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

TECHNISCHER BEREICH

[0001] Diese Erfindung betrifft ein Signalverarbeitungsverfahren und eine Vorrichtung für die Fehlererkennung und für andere Merkmale von rotierenden Komponenten, die in rotierenden Maschinen gleiten. Insbesondere betrifft sie ein Verfahren und eine Vorrichtung, welche Drehgeber zur synchronen Mittelung und zur Isolierung von Signalen verwenden, die von diesen asynchron rotierenden Komponenten erzeugt werden.

HINTERGRUND

[0002] Lager mit Rollenelementen („Rollenlager“) werden in größeren Stückzahlen hergestellt als alle anderen Komponenten von Präzisionsmaschinen, und Defekte an solchen Lagern sind die häufigste Ursache für einen Maschinenausfall. Die Fähigkeit, den Beginn eines Ausfalls der Elemente eines Rollenlagers zu erkennen, wie zum Beispiel den Beginn von Lochfraß oder Rissen in den Laufringen oder in den Rollenelementen, ist von grundlegender Bedeutung für eine vorbeugende Wartung der Maschinen und für die Vermeidung katastrophaler Maschinendefekte.

[0003] Rollenlager, andere Wälzlager, Riemen-Riemenscheiben-Gruppen und verschiedene andere Maschinenbauteile weisen im Normalbetrieb bekanntermaßen einen gewissen Schlupf auf. Die rotierenden Teile von Wechselstrom-Induktionsmotoren weisen ebenfalls einen Schlupf im Verhältnis zu ihren rotierenden elektromagnetischen Feldern auf. Verwirbeltes Öl und Ölschaum verursachen bekanntermaßen einen Schlupf in der Wellenbewegung relativ zur Wellendrehung in Achslagern. Die Zirkulation von Flüssigkeit rund um

die rotierende Welle in einem Achslager oder einem mechanischen Sitz kann als Schlupf einer rotierenden Komponente relativ zur Wellenbewegung betrachtet werden.

[0004] Vibrationsverarbeitungsmethoden einschließlich Leistungsspektraltechniken wurden verwendet, um den Betrieb einiger dieser rutschenden Bauteile zu analysieren. Bei Wälzlagern zeigt oft das Vorhandensein von großen Spektralkomponenten an der (1) Kugelpassierfrequenz des Innenrings, (2) der Kugelpassierfrequenz des Außenrings, (3) der Kugelumdrehungsfrequenz und (4) der Käfigdrehfrequenz sowie die höheren Harmonischen der einzelnen Bauteile das Vorhandensein von Fehlern in den zugehörigen Lagerbauteilen an. Es ist jedoch schwierig, diese Signale von Hintergrundgeräuschen zu unterscheiden. Wenn Fehler vorhanden sind, sind im allgemeinen Frequenzkomponenten vorhanden, die Modulationen oder Seitenbändern zwischen den vorhergehenden rutschenden Bauteilen und verschiedenen Harmonischen der Wellendrehfrequenz entsprechen. Diese Modulationen oder Seitenbänder wurden bislang allerdings noch nicht bei der Spektralanalyse von Lagern verwendet.

[0005] Das US-Patent US-A-4 931 949 beschreibt ein Analyse- system zur Erkennung von Getriebefehlern, welches in etwa dem Oberbegriff von Anspruch 1 entspricht. FR-A-2 681 942 offenbart die Verwendung einer mathematischen Umwandlung zum Erhalt von Informationen über unterschiedliche Parameter des zu analysierenden Signals. Weitere Hintergrundanordnungen sind in US-A-3 971 249 und JP-A-2-222818 beschrieben.

[0006] Auch andere Methoden, welche die impulsiven Exkursionen im Zeitsignal überprüfen oder die Amplituden höherer Frequenzbänder, wie z.B. Schockimpulse, Strefwellen und Spitzenenergie, messen, stehen in Verwendung. Alle diese Methoden werden jedoch nachteilig von Hintergrundgeräuschen beeinflußt und sind möglicherweise bei Vorhandensein zahl-

reicher störender Schmalbandstörkomponenten im Spektrum schwierig zu implementieren. Auch die Erzeugung von falschen Alarmsmeldungen, die bei solchen Methoden aufgrund des ständigen Vorhandenseins von Hintergrundgeräuschen erzeugt werden, stellt ein starkes Hindernis für den Verkauf von vorbeugenden Wartungsgeräten dar.

[0007] Eine als „wellensynchrone Mittelung“ bezeichnete Signalverarbeitungsmethode wurde zur Analyse von Getriebevibrationen und zur Erkennung von Getriebedefekten verwendet; „Low Frequency Vibration Generated by Gear Tooth Impacts“, NDT International, Band 18, Nr. 5, Oktober 1985. Diese Methode basiert auf der Tatsache, daß Zahnräder fest an ihre zugehörigen Wellen gekoppelt sind, und daß sie durch das Eingreifen ihrer Zähne auch fest aneinander gekoppelt sind. Aufgrund der fixierten Drehbeziehungen der Elemente in einer Getriebemaschine können Signale, die mit deren Drehung im Zusammenhang stehen, wie zum Beispiel Vibrationen, synchron gemittelt werden, das heißt, durch Überlagerung der Signale in fixierter Beziehung zur Winkel ausrichtung eines der Elemente der Baugruppe, wie zum Beispiel einer zahnradgetriebenen Welle. Für eine große Anzahl an Datengruppen erzeugt diese synchronmittelnde Getriebemethode Spektren, die nur jene Vibrationen reflektieren, welche synchron mit der Zahnradumdrehung sind, und keine asynchronen Vibrationen wie z.B. von Lagern und anderen Komponenten, die rutschen. Es sollte angemerkt werden, daß das einfache Subtrahieren aufeinanderfolgender Datensätze vor der Aufbereitung und Verarbeitung der Signale bei einer Maschine, welche synchron rotierende Bauteile enthält, die meisten der synchronen Signale, wie zum Beispiel die Harmonischen der Wellen, eliminiert. Im Falle eines komplexen Getriebes können alle von Zahnräder und Wellen erzeugten Signale durch Subtraktion der Datensätze eliminiert werden, die durch ein Ganzahlvielfaches des Zahnzyklusses, der das Übersetzungsverhältnis irrational macht, getrennt sind, wobei der das Übersetzungsverhältnis

irrational machende Zahnzyklus als Zeit definiert wird, die von allen daran beteiligten Zahnrädern und Wellen benötigt wird, um sich in ihre anfängliche Winkelausrichtung zu drehen.

[0008] Man geht davon aus, daß in jüngster Zeit von keiner Signalverarbeitungstechnik zur Verwendung in rutschenden Maschinenbauteilen berichtet wurde, die hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Fehlererkennung mit den oben beschriebenen bekannten Zahnradtechniken vergleichbar ist. Die vorliegende Erfindung erfüllt jedoch diese Aufgabe. Sie verkörpert neue Techniken und eine Vorrichtung zur Überwachung von rotierenden Maschinen mit rutschenden rotierenden Bauteilen als Mittel zur Fehlererkennung und zur Vorhersage und Verhinderung von katastrophalen Maschinenausfällen.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0009] Die Erfindung umfaßt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Fehlererkennung in rutschenden Maschinenbauteilen, z.B. Lagern mit Rollenelementen, durch synchrone Mittelung und weitere Verarbeitung asynchroner Signale, die von Maschinen ausgesandt werden. Das Verfahren verarbeitet Signale von einem Sensor, wie zum Beispiel einem Beschleunigungsmesser, der an der betreffenden Maschine fixiert oder auf diese gerichtet ist, und von einem Drehgeber, welcher die Rotation eines Bauteils der Maschine erfaßt. Die Signale von Sensor und Drehgeber werden durch Schnittstellenkreise jeweils zu einer Analogsignalvorbehandlungsvorrichtung beziehungsweise einem Drehgeberimpulsmultiplikator gesandt. Die Drehgeberimpulsserie wird multipliziert oder dividiert, um eine neue Impulsserie mit einer fixen Anzahl an Impulsen pro Drehgeberdrehung zu erzeugen, die mit dem Nyquist-Kriterium für Abtastfrequenzen übereinstimmt. Das Sensorsignal wird an eine Analogsignalvorbehandlungsvorrichtung weitergeleitet, welche das Signal vorbehandelt und an eine Prozessor- oder Computerstufe

weiterleitet. Der Computer digitalisiert das Signal und tastet es ab, wobei er ein impulsmultipliziertes Drehgeber-signal als externen Taktgeber verwendet. Dadurch erzeugt der Computer Datensätze mit fixer Länge, die dann vom Computer verarbeitet werden. Die Verarbeitung der Daten-sätze beginnt mit einer diskreten Fourier-Transformation (DFT). Die Komponenten der DFT oder ihre komplexe Konju-gierte werden danach verwendet, um eine neue Spektralfunk-tion, $G(I)$, zu berechnen, bei der es sich um eine 2-Form-Funktion oder eine Funktion höherer Ordnung verschiedener Formen handeln kann. Bei einer 2-Form-Funktion ist jedes Element von $G(I)$ das Produkt zweier DFT-Spektralkomponenten oder ihrer komplexen Konjugierten, wobei die Summe (oder Differenz) ihrer Frequenzen gleich einer fixierten Harmoni-schen der Wellenrotation ist. $G(I)$ wird über eine große Anzahl an Datensätzen gemittelt, um $\langle G(I) \rangle$ zu erzeugen. Auf ähnliche Weise würde es sich bei einer 3-Form um das Produkt von drei Spektralkomponenten handeln. Höhere Formen würden auf dementsprechende Weise gebildet. Bestimmte Spektralkomponenten, wie zum Beispiel für die rollenden Elemente, werden konstruktiv addiert. Hintergrundgeräusche werden jedoch destruktiv addiert und bewegen sich gegen Null hin. Das Ergebnis sind Spektrallinien, die in Verbin-dung mit spezifischen Maschinenbauteilen stehen, welche rutschen. Diese Spektrallinien oder deren Beziehungen werden verwendet, um den Zustand der Maschine sowie zahl-reiche andere Attribute der Maschine zu bestimmen. Diese bilden wiederum die Grundlage für Alarmmeldungen oder ande-re Meldungen, die vom Computer erzeugt werden.

[0010] Ein wichtiger Vorteil dieser Erfindung besteht darin, daß sie Synchronsignalmittelungstechniken generali-siert, wodurch deren Anwendung an Lagern und anderen rutschenden Bauteilen auf eine Weise ermöglicht wird, durch welche Bauteildefekte sogar bei Vorhandensein starker Hintergrundgeräusche erkannt werden können. Wird diese Technik in Verbindung mit Getriebeüberwachungstechniken

angewandt, so ermöglicht sie die Erkennung von Defekten in komplexen Rotationsmaschinen, die sowohl aus Bauteilen zusammengesetzt sind, welche sich synchron drehen, als auch aus solchen, die rutschen. Durch Verwendung von G höherer Ordnung und anderer Formen von G ist es möglich, die Wechselwirkungen sogar zwischen indirekt gekoppelten, asynchron rotierenden Bauteilen zu überprüfen, wie zum Beispiel zwischen zwei Lagern, die über ein Räderpaar gekoppelt sind. Somit stellt dies ein leistungsfähiges Werkzeug bei der Überprüfung komplexer Maschinen dar, die in modernen Anwendungen verwendet werden.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0011] Figur 1 ist ein Blockdiagramm der bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0012] Figur 2 ist ein Flußdiagramm der Schritte, durch welche das System Signale von Komponenten analysiert, die in Rotationsmaschinen rutschen, und Maschinendefekte erkennt.

[0013] Figur 3a ist eine idealisierte Darstellung eines Leistungsspektrums $\langle P(I) \rangle$, welches zeigt, wo voraussichtlich Spektrallinien für ein Rollenlager mit einem verschlissenen Rollenelement auftreten, wenn die Linien nicht im Hintergrundgeräusch untergehen würden, welche herkömmliche Techniken nicht wirkungsvoll unterdrücken.

[0014] Figur 3b ist ein aktuelles Leistungsspektrum $P(I)$, das für ein Lager mit Rollenelementen berechnet wurde, welches eine defekte Rolle besitzt.

[0015] Figuren 4A-4B zeigen ein aktuelles 2-Form-Spektrum $\langle G \rangle$ für die Rollenlagerdaten, die zur Bildung von $P(I)$ in Figur 3b verwendet wurden. Die Länge eines einzelnen Datensatzes beträgt 200 Wellenumdrehungen. Die Anzahl der in

Figur 4a gemittelten Sätze beträgt 112. In Figur 4b beträgt die Anzahl der gemittelten Sätze 1053. Die Empfindlichkeit ist proportional zur Quadratwurzel der Datensatzzahl.

[0016] Figur 5 ist ein idealisiertes Beispiel der gemittelten Spektralfunktion $\langle G \rangle$, wobei wir die Form $F(100-k)F(k)$ gewählt haben. Die Datensatzlänge beträgt 100 Umdrehungen der Welle, und J und L sind auf 100 beziehungsweise 0 eingestellt. Gemittelt über eine große Anzahl von Datensätzen bewegt sich das Hintergrundgeräusch gegen Null, und die Käfiglinien bewegen sich auf endliche Werte zu, wodurch sie leicht erfaßbar werden.

[0017] Figur 6 ist ein idealisiertes Beispiel der gemittelten Spektralfunktion $\langle G \rangle$, wobei wir die Form $F(200K)F(100+K)$ gewählt haben und die Datensatzlänge 100 Wellenumdrehungen entspricht. Bei dieser Form treten mehr Spektralspitzen auf, von denen einige zwecks besserer Verständlichkeit hier weggelassen wurden.

[0018] Figur 7 ist ein idealisiertes Beispiel einer gemittelten Leistungsspektraldichtefunktion $\langle P \rangle$ für ein Lager mit Rollenelementen mit einem defekten Außenring. Spektralkomponenten sind an der Kugelpassierfrequenz F_0 des Außenrings und Wellenmodulationskomponenten im Bereich der Kugelpassierfrequenz bei Frequenzen von $F_0 \pm S$ vorhanden.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0019] Im Zuge dieser Beschreibung werden ähnliche Zeichen zur Kennzeichnung ähnlicher Elemente gemäß den unterschiedlichen Figuren verwendet, welche die Erfindung veranschaulichen.

[0020] Die Erfindung gemäß der bevorzugten Ausführungsform ist in Figur 1 durch ein Blockdiagramm dargestellt. Ein Beschleunigungsmesser 2 erkennt die Vibrationen, die von

einer Rotationsmaschine erzeugt werden. Ein Drehgeber 4 erzeugt H' Impulse pro Umdrehung eines Maschinenbauteils, wie zum Beispiel einer Welle (im folgenden als Welle bezeichnet). Diese Signale werden zur Schnittstelle 6 weitergeleitet. Eine Impulsmultiplikationselektronik 8 erhöht oder verringert die Impulsrate, um H Impulse pro Wellenumdrehung zu erzeugen, die zum Computer 12 gesandt werden. Eine Analogelektronik 10 sorgt für die Signalaufbereitung des Beschleunigungsmeßgerätesignals. Der Computer 12 empfängt diese Signale, verarbeitet und analysiert sie, und leitet sie an die Peripheriegeräte, wie zum Beispiel eine RS-232-Verbindung 14, einen Bildschirm 16, einen Drucker 20 oder eine Tastatur 22, weiter. Der Computer enthält einen Analog-Digital-Prozessor 18, der das aufbereitete Beschleunigungsmeßgerätesignal in digitale Form umwandelt. Der externe Taktgeber, welcher den Digitalisierer steuert, wird von den Drehgeberimpulsen dargestellt.

[0021] Figur 2 zeigt eine detailliertere Beschreibung der Schritte zur Verarbeitung dieser Signale und zur Erkennung von Defekten. Der erste Schritt in der bevorzugten Methode umfaßt die Erkennung und Aufbereitung der Sensor- und Drehgebersignale. Der Sensor 2, welcher das Vibrationssignal erkennt, ist ein handelsüblicher piezoelektrischer Breitband-Beschleunigungsmesser mit einem Frequenzbereich, der von den niedrigsten in Frage kommenden Frequenzen bis 50 kHz oder mehr reicht. Das Sensorsignal kann auf mehrere verschiedene Arten aufbereitet werden, wobei zwei dieser Arten hier in der Figur dargestellt sind. In Schritt 1A wird das Signal vor dem Digitalisieren tiefpaßgefiltert (für Antialiasing) und für einen ausreichenden Dynamikbereich verstärkt. Im folgenden wird das alleinige Tiefpaßfiltern als Verfahren zum Erzeugen von Basisbanddaten angesehen. Im alternativen Aufbereitungsschritt 1B wird ein bestimmtes benötigtes Frequenzband, z.B. das Band von 30 - 50 kHz, mit einem Bandpaßfilter extrahiert, mit einem Hüllkurvendetektor behandelt, tiefpaßgefiltert und verstärkt

und danach zum Digitalisierer gesandt. Im folgenden wird das Bandpaßfiltern zur Erzeugung von Bandpaß- oder Hochfrequenzdaten erwogen.

[0022] Das Drehgebersignal wird von einem Drehgeber 4 geliefert, der aus einem befestigten Zahnrad oder einer anderen energiereflektierenden Oberfläche und einem magnetischen, optischen oder sonstigen Aufnehmer bestehen kann, der einen Impuls pro Wellendrehung liefert. Zum Beispiel würde ein Zahnrad mit 60 Zähnen um 6 Grad voneinander entfernt liegende Impulse liefern. In Schritt 1C kann die Impulsrate multipliziert oder dividiert werden, um H Impulse pro Wellendrehung zu liefern, womit das Nyquist-Kriterium für die Signalabtastrate erfüllt wird.

[0023] In Schritt 2 wird das aufbereitete Vibrationssensor-signal von Schritt 1A oder 1B von einem Analog-Digital-Wandler 18 mit jener taktsteuernden Abtastrate digitalisiert, welche von den Impulsen aus Schritt 1C geliefert wird. Somit werden exakt H digitale Abtastungswerte des Sensorsignals für jede Umdrehung einer in Frage kommenden Welle erzeugt.

[0024] In Schritt 3 sammelt der Computer N Datenabtastungen, um einen Datensatz zu bilden. Die erste Abtastung in jedem Datensatz wird so durchgeführt, daß sie an einer fixen Winkelposition der Welle erscheint. Die Länge des Datensatzes entspricht typischerweise exakt einer Ganzzahl an Wellenumdrehungen T, wobei $N=HT$ ist. Als nächstes wird eine komplexe DFT (FI) für den Datensatz berechnet. Die Länge des Datensatzes bestimmt die Auflösung des Spektrums. Zum Beispiel beträgt die Auflösung für einen Datensatz, der 100 Wellenumdrehungen bei einer Wellenrotationsrate von 30 Hz entspricht, 30/100 Hz, bzw. 0,3 Hz.

[0025] Die Anzahl der Abtastungen im Datensatz bestimmt die Anzahl der diskreten Frequenzen, die auch als Bins bezeich-

net werden, für welche die DFT gemäß der Formel $N/2 + 1$ berechnet wird. Wenn zum Beispiel $N=6000$ ist, gibt es 3001 Bins oder diskrete Frequenzen, an denen Spektrumwerte berechnet werden. Ausgehend davon, daß die Abtastrate von der Wellenrotationsrate (S) gesteuert wird, wird diese Technik als Ordnungsanalyse bezeichnet, wobei die Wellenordnungen (oder Harmonischen) an den Frequenzbins T , $2T$, $3T$ usw. vorhanden sind.

Erzeugung von 2-Form Spektren G

[0026] In Schritt 4 der Methode wird eine neue diskrete Spektralfunktion $G(J,K/L)$ berechnet. Diese Funktion kann abhängig von der Applikation verschiedene Formen annehmen. Beispiele umfassen $F(J-K)F(L+K)$ und $F(J-K)F^*(K-L)$, wobei F^* die komplexe Konjugierte repräsentiert. K ist eine positive Ganzzahl kleiner als J , welche die diskreten Frequenzen oder Bin-Werte repräsentiert, für die G gebildet wird. J und L sind Wellenordnungs-Binwerte. Die Spektralfunktionen können zahlreiche Formen annehmen, wie z.B. für eine Wellenfrequenz von 100;

$F(K)F(100-K)$, $F(100+K)F(100-K)$,
 $F(K)F(200-K)$, $F(200+k)F(200-K)$,
 $F(K)F(300-K)$, $F(100+K)F(200-K)$,
 $F(K)F(400-K)$, $F(200+K)F(300-K)$,
 $F(K-100)F^*(K+100)$, $F(K-100)F^*(K+200)$

[0027] Das Produkt der zwei Spektralkomponenten erzeugt zwei neue Spektralkomponenten mit Frequenzen, die der Summe beziehungsweise der Differenz der ursprünglichen Komponenten entsprechen. Die Summe der Frequenzkomponenten einer jeden Form ist gleich einem Ganzzahlvielfachen von T , dem ersten Bin der Wellenharmonischen, das heißt, 100, 200 oder 300. Wichtig für die Methode ist, daß diese summierten Komponenten synchron mit der Wellenrotation sind und synchron addiert und gemittelt werden können.

[0028] In Schritt 5 der Methode wird die auf diese Weise gebildete Spektralfunktion G über M - das typischerweise eine große Anzahl repräsentiert - Datensätze gemittelt, um die gemittelte Funktion $\langle G \rangle$ zu bilden. Frequenzkomponenten von G, welche der Käfigrotationsfrequenz C oder ihren Harmonischen 2C, 3C usw. und anderen synchron damit im Zusammenhang stehenden Komponenten entsprechen, besitzen fixierte Phasen relativ zueinander und werden konstruktiv addiert, wohingegen andere Komponenten, die zueinander in keiner Beziehung mit fixen Phasen stehen, destruktiv addiert werden und gegen Null hin gehen.

[0029] In Schritt 6 wird $\langle G \rangle$ automatisch auf Extremwerte in den Spekralbinregionen überprüft, wo Komponentenlinien erwartet werden. Zum Beispiel treten die Lagerkäfiglinien typischerweise an Bins zwischen dem 0,35 und dem 0,45-fachen der ersten Wellenordnungsbinzahl auf. Solcherart erkannte Extremwerte werden zur Berechnung des Zustandes der verschiedenen Bauteile verwendet, an denen Interesse besteht.

[0030] Figur 3a ist eine idealisierte Darstellung eines Leistungsspektrums $\langle P(I) \rangle$ für ein Rollenlager mit einem verschlissenen Rollenelement, das darstellt, wo Spektrallinien auftreten würden, wenn sie nicht von Hintergrundgeräuschen verdeckt würden, mit denen herkömmliche Spektraltechniken zu kämpfen haben. Die Datensatzlänge beträgt 100 Wellenumdrehungen. Spektralkomponenten an den Bins, welche die erste und die zweite Wellen-Harmonische, 2S und 3S, die erste, zweite und dritte Harmonische der Käfigfrequenzen, C, 2C und 3C, und die verschiedenen Intermodulationen, S-2C, S-C, 2S-3C, usw., repräsentieren, sind vorhanden. Während Wellen-Harmonische exakt auf Integer-Bin-Werte fallen, ist dies aufgrund der Natur der Analyse bei anderen Komponenten, wie zum Beispiel C oder S-2C, typischerweise nicht der Fall. Die Spektralenergien dieser Komponenten

neigen dazu, in benachbarte Bins „überzuschwappen“, und erscheinen als leicht verbreiterte Spektralkomponenten.

[0031] Ein wichtiger Faktor, welcher der vorliegenden Erfindung zugrundeliegt, besteht darin, daß die Intermodulationslinien an den Bins S-2C, 2S-3C usw. von nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen dem Lagerkäfig und der Welle verursacht werden. Als Ergebnis dieser Tatsache werden die Amplituden und Phasen dieser Intermodulationsspektralkomponenten für einen gegebenen fixierten Lagerzustand direkt von den Amplituden und Phasen der Spektralkomponenten des Lagerkäfigs und der Welle bestimmt.

[0032] Figur 3b ist ein aktuelles Leistungsspektrum $\langle P(I) \rangle$, das für ein Lager mit Rollenelementen mit einem defekten Rollenelement berechnet wurde, welches auch als Käfigdefekt betrachtet werden kann, da sich das Rollenelement mit dem Käfig bewegt. Wie oben erwähnt, wird eine Spektrallinie, welche die Käfigrotationsfrequenz repräsentiert, zwischen dem 0,35 und dem 0,45-fachen der Wellenfrequenz oder zwischen den Bins 70 und 90, in diesem Fall bei S=200, erwartet. Eine sichere Identifizierung der Käfigspitze ist nicht möglich.

[0033] Figur 4A-4B zeigen Beispiele eines aktuellen 2-Form-Spektrums $\langle G \rangle$, das mit den Daten berechnet wurde, die zur Bildung von $P(I)$ in Figur 3b verwendet wurden. Die Datensatzlänge beträgt 200 Wellenumdrehungen. $\langle G(I) \rangle$ wird in 4a über 112 Datensätze und in 4b über 1053 Datensätze gemittelt. In 4a beginnt eine Spalte bei Bin 61 aufzutauchen. In 4b sehen wir, daß die Linie bei Bin 81 klar erkennbar die Käfiglinie ist. Eine Linie erscheint auch bei Bin 38, bzw. S-2C. Bei einer größeren Anzahl an Datensätzen werden die verschiedenen Wellen-, Käfig- und Wechselwirkungslinien noch vollständiger vom Hintergrundgeräusch unterschieden, da die Empfindlichkeit bei dieser Methode proportional zu $M^{0,5}$ ist. G kann auch in höheren Ordnungsformen berechnet

werden, zum Beispiel für die Anwendung an Maschinen mit komplexeren Wechselwirkungen. Auch hier ist es erforderlich, daß Komponentenfrequenzen zu einer Vielzahl von Wellenfrequenzen addiert werden. In solchen Formen höherer Ordnung sind Linien erkennbar, welche Wechselwirkungen repräsentieren, wie z.B. zwischen den Käfigen zweier Lager. Wenngleich Wechselwirkungslinien höherer Ordnung in ihrer Magnitude verringert werden, können sie trotzdem bei der Bestimmung von Attributen der Maschine nützlich sein.

[0034] Figur 5 und 6 zeigen idealisierte Mittelungsfunktionen, $\langle G \rangle$, die für ein Lager mit einer unregelmäßigen oder beschädigten Rolle oder einen beschädigten Käfig erwartet werden können. Sowohl in Figur 5 als auch in Figur 6 beträgt die Datensatzlänge 100 Wellenumdrehungen. In Figur 5 ist $J=100$ und $L=0$. In Figur 6 ist $J=200$ und $L=100$. (Aus Gründen der Verständlichkeit zeigt Figur 6 nur einige Spektrumkomponenten.)

Alarm und Abschaltung

[0035] In Schritt 7 der Methode wird eine Entscheidung hinsichtlich der Beziehung der in Schritt 6 erzeugten Merkmale oder Maßnahmen bezüglich bestimmter voreingestellter Kriterien getroffen. Je nach Erfordernis wird eine Alarmmeldung oder eine andere Meldung vom Computer 12 erzeugt. Derartige Analysen können die Überprüfung historischer Trends in den in den Schritten 1 - 6 erzeugten Merkmalen oder Maßnahmen umfassen.

[0036] Auch andere Ausführungsformen und Abwandlungen dieser Erfindung sind denkbar.

[0037] In Schritt 1 kann es sich bei dem Sensor um jede beliebige Vorrichtung handeln, welche Signale erkennt, die von dem Lager oder anderen Bauteilen von Interesse erzeugt werden. Dazu gehören zum Beispiel Wegmeßsensoren oder

Geschwindigkeitssensoren, Mikrophone oder Sensoren für akustische Emissionen.

[0038] Datensätze müssen keiner paarweisen Subtraktion unterzogen werden, um Sensorsignale zu entfernen, die kohärent addieren. Das Ergebnis ist, daß die berechneten Spektren Komponenten beibehalten, welche derartigen synchron rotierenden Komponenten, wie Wellen und Zahnräder, zugeordnet sind, was in manchen Anwendungen erwünscht sein kann.

[0039] Wenngleich es wünschenswert ist, daß die Anzahl der Abtastungen pro Wellenrotation, H, eine Ganzzahl ist, ist dies dennoch nicht unbedingt erforderlich. Es reicht aus, daß es sich um eine feststehende Zahl handelt. Dieser Ansatz mag bei der Analyse von Getrieben von Vorteil sein, da der Drehgeber eine Ganzzahl an Impulsen für eine gegebene Welle liefern kann, jedoch im allgemeinen nicht für andere Wellen im Getriebezug. Nehmen wir zum Beispiel den Zahneingriff eines 11-Zahn-Zahnrad mit einem 30-Zahn-Zahnrad, wobei ein Drehgeber H Impulse pro Drehung jener Welle abnimmt, welche das 11-Zahn-Zahnrad trägt. Für die Welle, welche das 30-Zahn-Zahnrad trägt, ist die Anzahl der Impulse pro Umdrehung $30H/11$, was keine Ganzzahl sein muß. Die Analyse ist gegenüber der Anzahl der Impulse indifferent, solange die Datensätze ein feststehendes Vielfaches der Wellenumdrehungen sind.

[0040] In Schritt 3 ist es wünschenswert, aber nicht erforderlich, eine Datensatzlänge zu verwenden, welche einer Ganzzahl an Wellenumdrehungen entspricht. Wenn Datensätze einer anderen Länge gewählt werden, müssen die Wellenspektrallinien nicht unbedingt exakt auf Spektralbins fallen. In diesem Fall sollten beim Berechnen von G Bin-Werte für J und L ausgewählt werden, die sehr nahe den Ordnungen der Wellen-Harmonischen liegen. Wenngleich bei diesem Ansatz etwas an Empfindlichkeit eingebüßt wird, kann er doch

wünschenswert sein, wenn die Notwendigkeit zur Erzeugung von FFT-Spektren die Datensätze auf eine Ganzzahlleistung mit einer Länge von zwei Datenpunkten einschränkt.

[0041] Wenngleich es wünschenswert ist, ist es doch nicht unbedingt erforderlich, jeden Datensatz an der selben Winkelausrichtung der Welle zu beginnen oder einen Drehgeber zur Steuerung der Digitalisierung zu verwenden. So ermöglicht zum Beispiel eine Gruppe von Datensätzen mit willkürlichen Startpunkten relativ zur Winkelposition der Welle bei Bildung von $G=F(J-K)F(L+K)F^*(J+L)$, wobei F^* die komplexe Konjugierte der Spektralfunktion ist, eine kohärente Mittelung von G . Wird kein Drehgeber verwendet, können Wellenspektrallinien benutzt werden, um einen Impulszug als externen Taktgeber zur Digitalisierung und Abtastung des Signals zu berechnen.

[0042] Die oben beschriebenen Methoden beziehen sich hauptsächlich auf die Erkennung von Problemen im Zusammenhang mit Käfigen oder Rollen in Rollenlagern. Die Methode dieser Erfindung kann auch verwendet werden, um Probleme im Zusammenhang mit Ringen in Lagern zu erkennen. Defekte an Außen- und Innenringen neigen dazu, Vibratoren bei mC beziehungsweise $m(S-C)$ zu erzeugen, wobei m die Anzahl der Rollenelemente ist. Somit können Ringdefekte wie in der Methode durch die obigen Schritte 1 - 7 erkannt werden. Wenn Defekte in beiden Ringen vermutet werden, wird J gleich mT und $L=0$ gesetzt. Die Summe von mC und $m(S-C)$ ist gleich mS , welche synchron mit der Wellenrotation ist und eine Spektrallinie in G oder $\langle G \rangle$ bei Bin mS erzeugt.

[0043] Interessant ist die Tatsache, daß die Außenringkomponente der Spektren bei Bin mS dazu neigt, bei einem gewissen Pegel im Basisband in allen Lagern vorhanden zu sein. Um daher Vibratoren von Innenringdefekten zu isolieren, werden J und L auf mT beziehungsweise 0 gesetzt. Eine Alternative besteht darin, G als $F(L+K)$ unter Verwendung

von Basisbanddaten mit $L=0$ zu berechnen, und $F(J-K)$ unter Verwendung eingehüllter Hochfrequenzdaten mit $J=mT$ zu berechnen. Diese Technik erfordert die gleichzeitige Digitalisierung sowohl von Hoch- als auch von Niederfrequenzdaten, da die Methode einen gleichzeitigen Datensatz für beide Frequenzbänder erfordert.

[0044] Unter der Annahme, daß die Außenringkomponente, mC , dazu neigt, in einem Basisband universell präsent zu sein, können Außenringdefekte in den umhüllten Hochfrequenzdaten mit einer standardmäßigen kohärenten Querspektralberechnung zwischen den zwei Signalen und der Suche nach einer Linien spitze im Bereich von Bin mC erkannt werden. Der Grund dafür liegt darin, daß sowohl Hoch- als auch Niederfrequenzkomponenten vom Außenring erzeugt werden und daher zueinander kohärent sind.

[0045] Wenn sich ein Lagerdefekt entwickelt, sind die Wellenfrequenzseitenbänder rund um die defekte Frequenz F_0 typischerweise symmetrisch. Figur 7 zeigt ein Mittel zur Nutzung dieser Tatsache bei der Erkennung von Defekten. In diesem Beispiel ist die Wellenfrequenz S gleich 25 Hz. Die funktionale Form von G ist daher $F(K-25)F^*(K+25)$.

[0046] Defekte Lager erzeugen auch oft ein hörbares Klingeln bei einer Resonanzfrequenz F_R , welche an der Wellenrotation moduliert wird. Die obige funktionale Form würde ebenfalls dieses Signal erkennen, wenn $K=F_R$ ist.

[0047] Es sind auch weitere Abwandlungen an der in Figur 2 dargestellten bevorzugten Ausführungsform möglich. Anstatt das Drehgebersignal dazu zu verwenden, den Digitalisier taktgeber zu steuern, könnte man einfach den internen Takt des Computers verwenden, um die Abtastung sowohl des Vibrationssignals als auch einer Einmal-pro-Umdrehung-Komponente des Drehgebersignals zu steuern. Ein solches Drehgebersignal würde sehr starke Harmonische der Wellenrotationsfre-

quenz enthalten. Nachdem Spektren sowohl für die Vibrations- als auch für die Drehgebersignale berechnet wurden, kann G in die Form $F(J-L)F(L+K)F'^*(J+L)$ generalisiert werden, wobei F'^* die komplexe Konjugierte des komplexen Spektrums des Drehgebersignals ist. Diese generalisierte Funktion G wird wie zuvor über eine ausreichende Anzahl an Datensätzen feststehender Länge, doch mit willkürlichen Startpunkten im Hinblick auf die Winkelausrichtung der Welle gemittelt.

[0048] Wenn die harmonischen Linien der Welle eine ausreichende Magnitude im Vibrationssignal aufweisen, wird kein Drehgeber benötigt. In der obigen Form wird F' durch F ersetzt. Wenngleich dies möglich ist, können Einschränkungen, wie zum Beispiel eine mangelnde Unterscheidung aller Wellenharmonischen und das Vorhandensein von Geräuschen in der Umgebung dieser Harmonischen, dazu führen, daß G sehr langsam konvergiert.

[0049] Wir möchten auch darauf hinweisen, daß Abweichen von der beschriebenen Methode verwendet werden können, um bestimmte Merkmale von Lagern mit oder ohne wesentlichen Defekten zu bestimmen. Alle Lager besitzen bestimmte Unregelmäßigkeiten, welche die in Figur 3 dargestellten Basisbandvibrationen erzeugen. Somit kann die Form $F(K)F(S-K)$ zur Bestimmung der Käfigfrequenz verwendet werden. Während Spalten für nicht defekte Lager meistens kleiner sind, können die Spalten durch Mittelung über mehrere Datensätze vom Hintergrund unterschieden werden. Nachdem die Käfigfrequenz bestimmt wurde, ist es auch möglich, mit Hilfe bekannter Formeln das Verhältnis zwischen dem Innen- und Außenringdurchmesser aus dem Verhältnis zwischen den Käfig- und den Wellenfrequenzen zu berechnen.

[0050] Die Anzahl an Rollen in einem Lager kann ebenso mit Hilfe der Form $F(S)F(mS-K)$ berechnet werden, wobei m die Anzahl der Rollen ist. Der Wert für m, der den Höchstwert

27.01.00

- 18 -

von G erzeugt, wenn K gleich der Kugelpassierfrequenz des Außenrings ist, repräsentiert die Anzahl der Rollen im Lager.

[0051] Es zeigt sich also, daß Defekte in Lagern und anderen rutschenden, sich drehenden Elementen von Rotationsmaschinen erkannt werden können und eine frühe Warnung vor drohenden Ausfällen möglich ist, indem die oben beschriebenen Signalverarbeitungsmethoden verwendet werden. Obwohl die Erfindung in Verbindung mit spezifischen und bevorzugten Ausführungsformen derselben beschrieben wurde, können weitere Modifizierungen daran vorgenommen werden, ohne dadurch von der Erfindung abzuweichen. Wenngleich sich insbesondere die angeführten Beispiele auf Rollenlager beziehen, können die selben Prozeduren für andere rutschende Komponenten verwendet werden, die ein Anwender überwachen möchte. Diese Anmeldung soll sämtliche Abwandlungen, Anwendungen oder Adaptierungen der Erfindung abdecken, welche im allgemeinen den Prinzipien der Erfindung folgen, und sie soll derartige Abweichungen von der vorliegenden Offenbarung umfassen, welche innerhalb bekannter oder traditioneller Praktiken innerhalb des Fachbereiches liegen, zu welchem die Erfindung gehört, oder welche zum Zeitpunkt der Verabschiedung für Fachleute dieses Bereiches offensichtlich sind. Es sollte anerkannt werden, daß der Umfang dieser Erfindung nicht auf die detaillierte Beschreibung der obigen Erfindung beschränkt ist, sondern stattdessen den in den folgenden Ansprüchen definierten Gegenstand umfaßt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Analyse einer arbeitenden umlaufenden Maschine mit wechselwirkenden Bauteilen, wobei die wechselwirkenden Bauteile mindestens ein erstes, sich relativ zu einem zweiten Bauteil asynchron drehendes Bauteil, wobei das erste Bauteil ein Asynchronbauteil und das zweite Bauteil ein Synchronbauteil ist, umfassen, mit folgenden Schritten:

- a. Erfassen eines Maschinensignals von der umlaufenden Maschine, wobei das Maschinensignal mehrere von den wechselwirkenden Bauteilen erzeugte Wechselwirkungselemente aufweist,
- b. Aufbereiten des Maschinensignals, um ein aufbereitetes Signal zu erzeugen,
- c. Digitalisieren des aufbereiteten Signals, um pro Umdrehung des zweiten Bauteils eine feste Anzahl von digitalisierten Abtastwerten zu erzeugen;
- d. Erfassen von Datensätzen fester Länge, wobei die Sätze aus einer konstanten Anzahl der digitalisierten Abtastwerte bestehen, in denen der erste digitalisierte Abtastwert jedes der Datensätze fester Länge bei einer festen Winkelorientierung des zweiten Bauteils auftritt,
- e. Durchführen einer Analyse der Datensätze durch diskrete Fourier-Transformation (DFT);

gekennzeichnet durch das Bilden einer Spektralfunktion G durch Multiplizieren von Paaren von Komponenten der DFT bzw. der komplex Konjugierten der DFT, um multiplizierte Paare zu erzeugen, so daß die Summe bzw. Differenz der jeweiligen Frequenzen von jedem der multiplizierten Paare eine Konstante und etwa gleich einer spezifischen

Harmonischen der Rotationsfrequenz das zweiten Bauteils ist;

Summieren der multiplizierten Paare über mehrere M der Datensätze und Dividieren durch M, um einen Durchschnitt zu bilden; und Analysieren des Durchschnitts auf Extremwerte hin.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Maschinensignal ein Vibrationssignal ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem in Schritt b die Aufbereitung die Schritte der Tiefpaßfilterung des Maschinensignals und Verstärken des gefilterten Signals zur Erzeugung eines Basisbands umfaßt.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem in Schritt b die Aufbereitung durch die Schritte der Bandpaßfilterung der Maschinensignalhüllkurve, der Erfassung des gefilterten Signals und der Verstärkung des eingehüllten Signals durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem ein Rotationssignal für das Synchronbauteil erfaßt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Rotationssignal mit Hilfe eines Drehwinkelgebers erfaßt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Rotationssignal durch Filtern eines erfaßten Signals von der umlaufenden Maschine gebildet wird, um eine spezifische Harmonische des Synchronbauteils zur Bildung des Rotationssignals zu erzeugen.
8. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Schritte c bis

d folgende Schritte umfassen:

Modifizieren des Rotationssignals, um mehrere Impulse zu bilden, wobei die mehreren Impulse eine Impulsfolge bilden,
Digitalisieren des aufbereiteten Signals mit einer durch die Impulsfolge gesteuerten Geschwindigkeit, um ein digitalisiertes Signal zu erzeugen, wobei das digitalisierte Signal mehrere Digitalsignalelemente aufweist;
Bilden von Folgen aus den Digitalsignalelementen mit einer festen Länge, wobei die Folgen zeitlich durch ein ganzzahliges Vielfaches der Umlaufperiode der Maschine voneinander getrennt sind;
Verbessern des digitalisierten Signals durch paarweises Subtrahieren aufeinanderfolgender Folgen, um eine Folge von verbesserten Digitalsignalelementen zu bilden;
Bilden der Datensätze fester Länge durch Erfassen einer festen Anzahl der verbesserten Digitalsignalelemente, wobei jeder der Datensätze an einer festen Stelle bezüglich der Winkelorientierung des Synchronbauteils initialisiert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Schritte c bis d folgende Schritte umfassen:

Digitalisieren des aufbereiteten Signals und des Rotationssignals unter der Steuerung durch einen internen Takt; und
Bilden der Datensätze gleicher Länge für das aufbereitete Signal und das Rotationssignal.

10. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Schritte c und d folgendes umfassen:

Digitalisieren des aufbereiteten Signals unter der Steuerung durch einen internen Takt; und Bilden der Datensätze des aufbereiteten Signals mit gleicher Länge.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter mit dem Schritt des Auslösens eines Alarms mit den Attributen.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Frequenzstellen gewisser der Attribute dazu verwendet worden, andere Attribute der Asynchronbauteile zu berechnen, wobei zu den Attributen Relativdurchmesser von Lagerbauteilen und die Anzahl von Elementen in einem Lager mit rollenden Elementen zählen.

13. Einrichtung zum Analysieren von Signalen von einer umlaufenden bzw. rotierenden Maschine, bei dem ein erstes Bauteil der Maschine eine Rotationsfrequenz aufweist und physisch mindestens einem zweiten umlaufenden Bauteil zugeordnet ist, wobei das erste Bauteil ein Asynchronbauteil und das zweite Bauteil ein Synchronbauteil ist, wobei die Einrichtung folgendes umfaßt:

einen an die Maschine gekoppelten Sensor (2);
eine an den Sensor gekoppelte Schnittstelle (6);
ein an die Schnittstelle angeschlossenes Aufbereitungsmittel zum Aufbereiten des Signals von der umlaufenden bzw. rotierenden Maschine, um ein aufbereitetes Signal zu erzeugen;
ein Digitalisierungsmittel zum Digitalisieren

des aufbereiteten Signals; ein gepulstes Signalmittel zum Steuern des Digitalisierungsmittels, um pro Umdrehung des zweiten Bauteils eine feste Anzahl von digitalisierten Abtastwerten zu erzeugen; und ein Rechnermittel zum Erfassen von Datensätzen fester Länge, wobei die Sätze aus einer konstanten Anzahl digitalisierter Abtastwerte bestehen, in denen der erste digitalisierte Abtastwert jedes der Datensätze fester Länge bei einer festen Winkelorientierung das zweiten Bauteils auftritt, und Durchführen einer Analyse der Datensätze durch diskrete Fourier-Transformation (DFT);

gekennzeichnet durch einen Multiplizierer für das Bilden einer Spektralfunktion G durch Multiplizieren von Paaren von Komponenten der DFT, um multiplizierte Paare zu erzeugen, so daß die Summe bzw. Differenz der jeweiligen Frequenzen von jedem der multiplizierten Paare eine Konstante und etwa gleich einer spezifischen Harmonischen der Rotationsfrequenz des zweiten Bauteils ist; ein Mittel zum Summieren der multiplizierten Paare über mehrere M der Datensätze und Dividieren durch M, um einen Durchschnitt zu bilden;

ein Mittel zum Analysieren des Durchschnitts auf Extremwerte hin; und ein Ausgabemittel zur Anzeige der Ergebnisse der Analyse.

14. Einrichtung nach Anspruch 13, weiter mit einem mit der Maschine verbundenen Drehwinkelgeber, wobei der Drehwinkelgeber für jede Drehung des zweiten Bauteils eine feste Anzahl von Impulsen des Signals erzeugt; und

ein Impulsmultipliziermittel zum Verändern der Impulsrate von dem Geber zu einer optimierten Rate.

15. Einrichtung nach Anspruch 14, bei der das Ausgabemittel aus einem CRT-Monitor besteht.

16. Einrichtung nach Anspruch 15, bei der das Ausgabemittel weiterhin aus einem Alarm besteht, der anzeigt, wann die Attribute der Signale vorbestimmte Kriterien erfüllen.

17. Einrichtung nach einem der Ansprüche 13 bis 16, bei der der Sensor ein Vibrationssensor ist.

18. Einrichtung nach Anspruch 17, bei der das Rechnermittel dafür ausgelegt ist, an den Datensätzen fester Länge die DFT-Analyse durchzuführen, und die Paare der DFT-Komponenten multipliziert, eine DFT-Signalkomponente für eine spezifische Harmonische der komplex Konjugierten des zweiten Bauteils erhält und das multiplizierte Paar zur Bildung einer 3-Form $G(I)$ mit der Komponente der komplex Konjugierten multipliziert, und die 3-Form $G(I)$ über eine vorbestimmte Anzahl der Datensätze mittelt, um $\langle G(I) \rangle$ zu bilden, und die Funktion auf interessierende Attribute hin analysiert.

27.01.00

0693 176

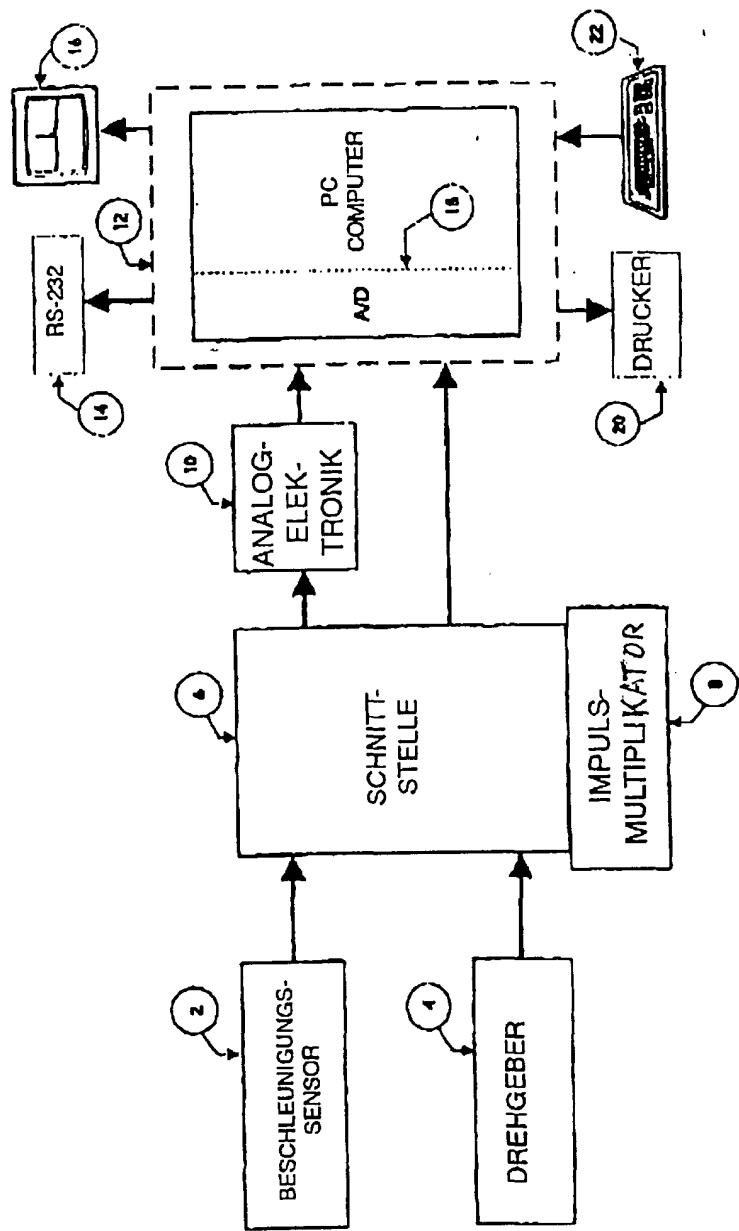
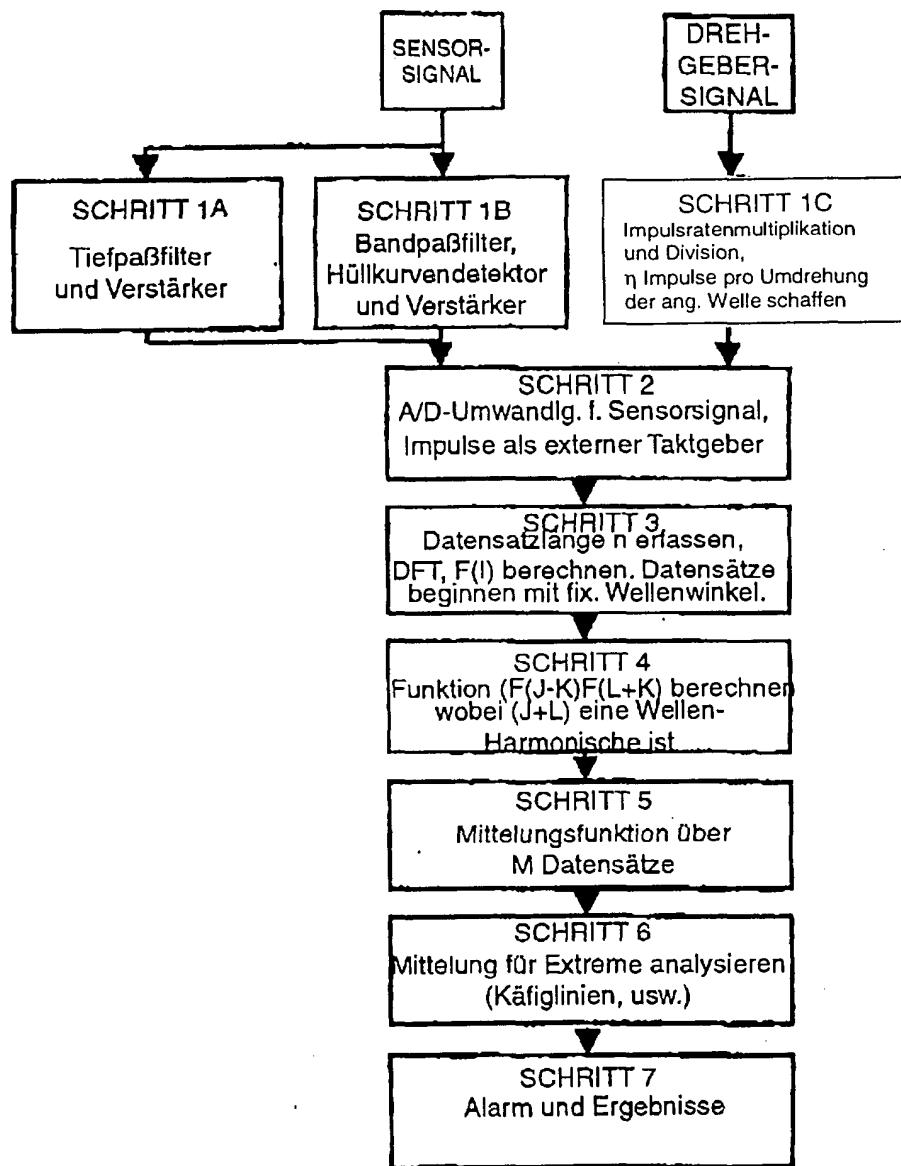


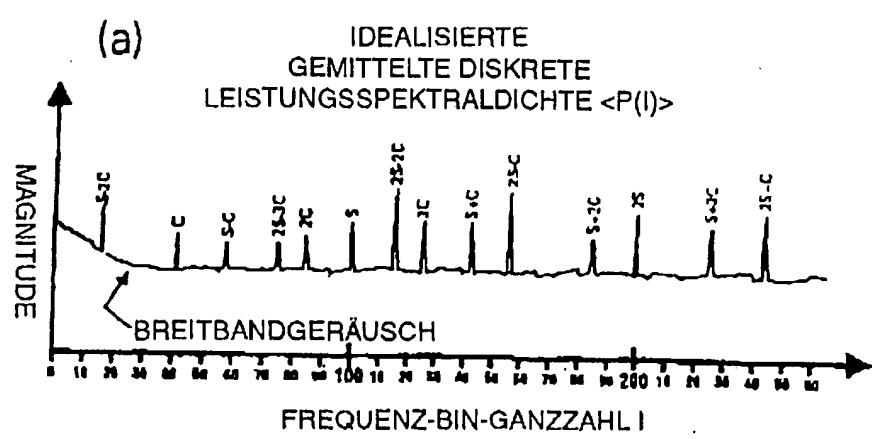
Figure 1

27.01.00



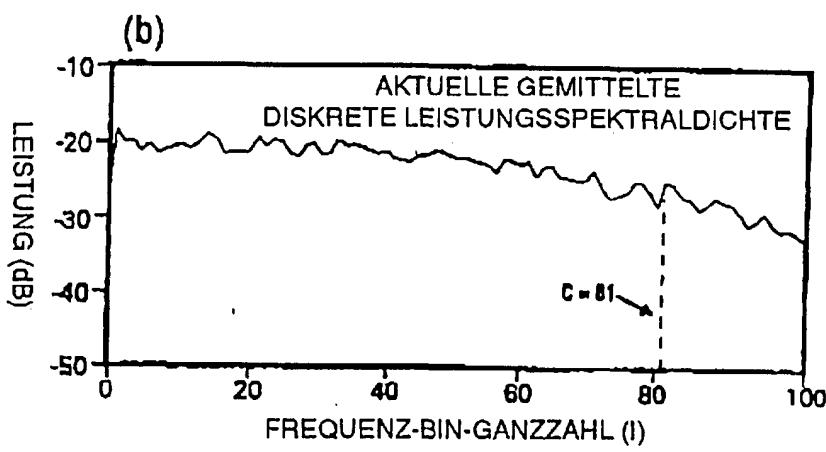
Figur 2

27.01.00



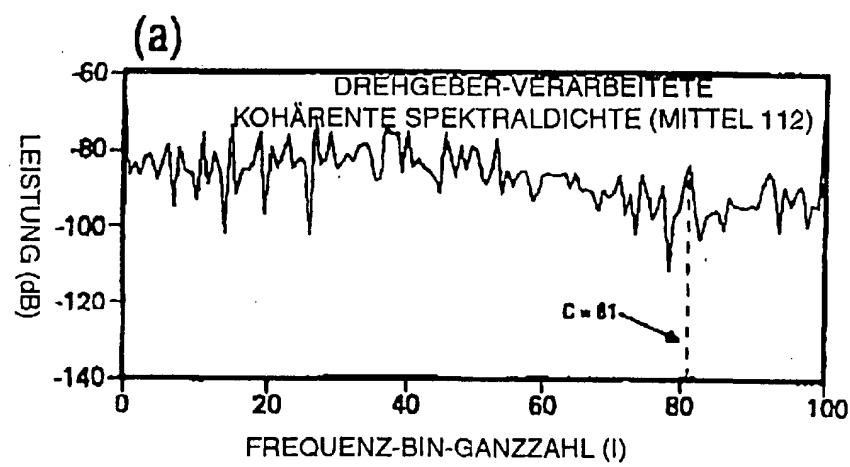
FIGUR 3A

27.01.00



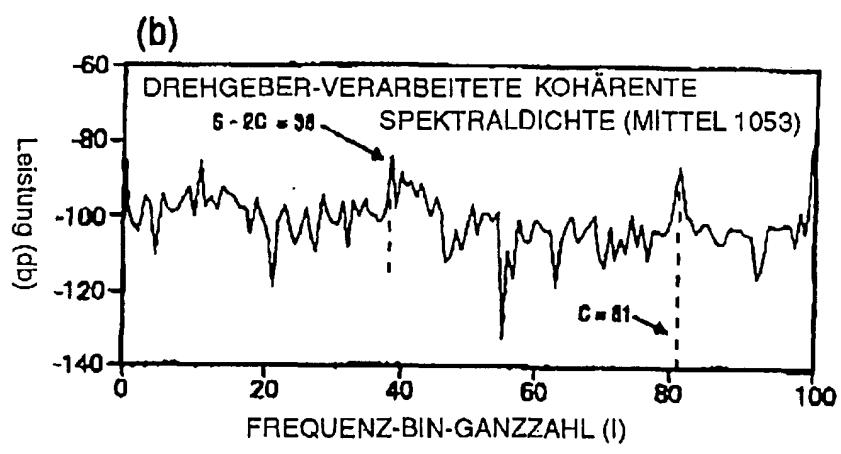
FIGUR 3B

27.01.00

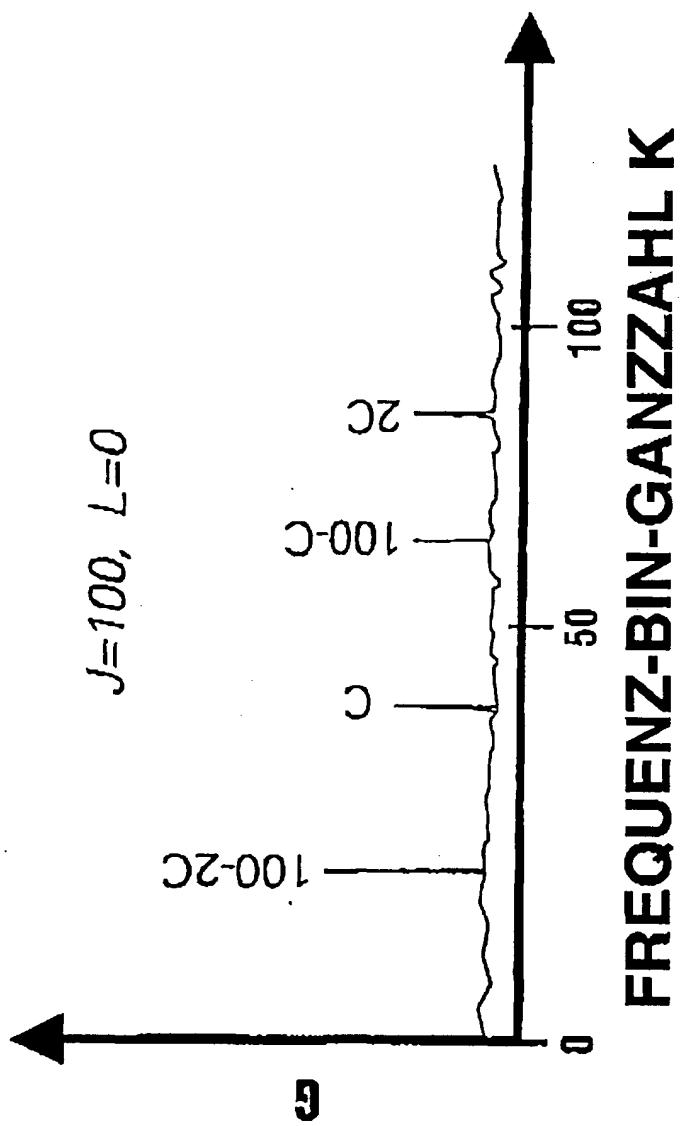


FIGUR 4A

27.01.00

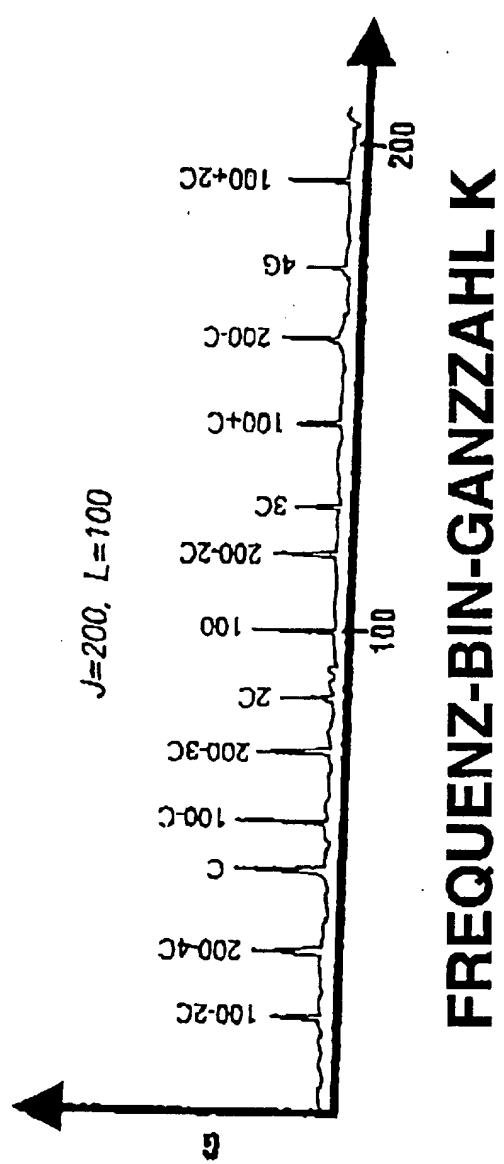


27.01.00



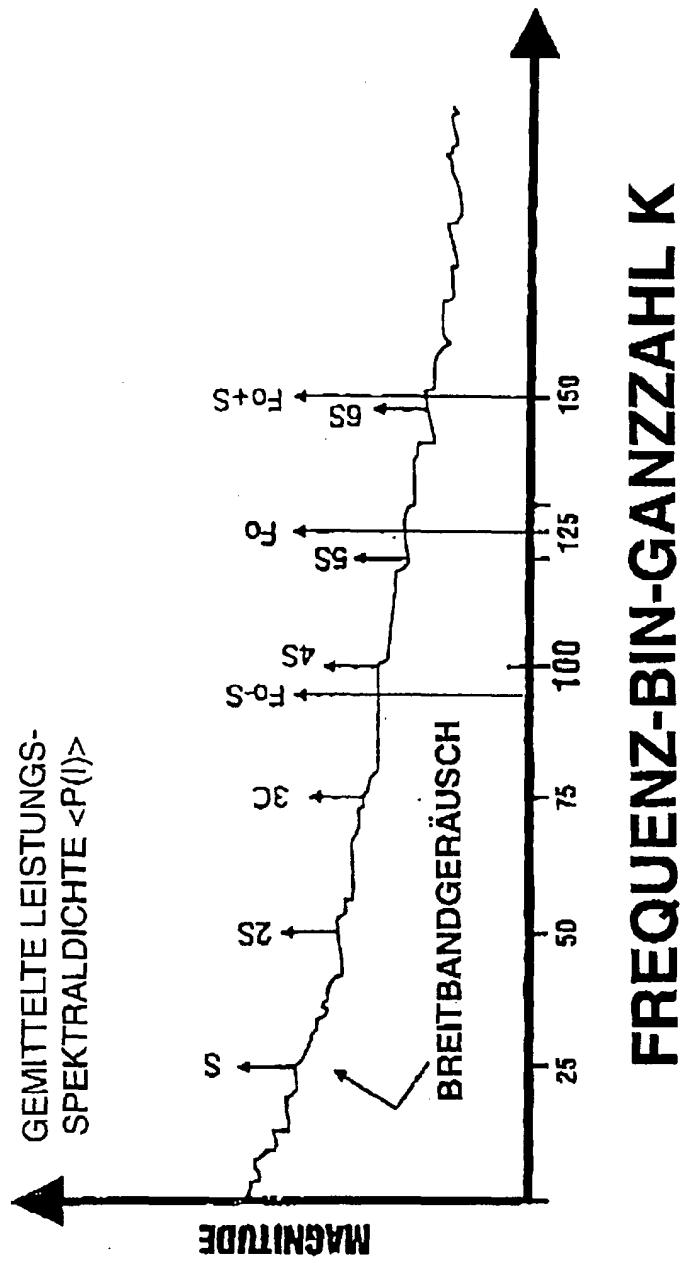
Figur 5

27.01.00



FIGUR 6

27.01.00



FIGUR 7